

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ СТАТОРА МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Введение

Машина двойного питания (МДП), в отличие от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, кроме управляющего двумерного вектора напряжения ротора, имеет источник возбуждения статора - напряжение статора, что дает дополнительную степень свободы в управлении электрической машиной. Избыточность в управлении МДП позволяет расширить цели управления, используя дополнительное управляющее воздействие для оптимизации энергетической эффективности процесса электромеханического преобразования энергии. В частности, благодаря свойству избыточности МДП по управлению, возможно управление моментом электрической машины с одновременным регулированием коэффициента мощности статорной цепи.

Целью данной статьи является теоретическое исследование качества одновременного управления реактивной мощностью и моментом МДП при использовании двух концепций: ориентации по вектору потокосцепления статора и ориентации по вектору напряжения сети.

Алгоритм с ориентацией по вектору потокосцепления статора

При ориентации оси d синхронно вращающейся системы координат (d - q) по вектору напряжения сети, модель МДП, записанная через токи ротора – потокосцепления статора, имеет вид [1].

Первые решения [2] и [3] по созданию алгоритмов векторного управления МДП используют общую концепцию ориентации управления по полю машины, аналогично тому, как это осуществляется для АД с короткозамкнутым ротором. При этом предполагается, что активным сопротивлением статора R_1 можно пренебречь в силу его малости, роторная цепь питается от источника тока. В соответствии с этой концепцией ось q , вращающейся системы координат (d - q), ориентируется по вектору потокосцепления статора. При нулевых начальных условиях решение системы уравнений, описывающих динамику потокосцеплений статора, имеет вид

$$\begin{aligned}\Psi_{1d} &= 0 \\ \Psi_{1q} &= -U_m / \omega_1 = \text{const},\end{aligned}\quad (1)$$

где U_m и ω_1 - амплитуда и угловая скорость вращения вектора напряжения сети.

Следовательно, если активным сопротивлением статора пренебречь, то модуль потокосцепления статора можно считать постоянным и не зависящим от тока ротора. В этом случае условия ориентации по вектору потокосцепления статора и вектору напряжения статора совпадают, поэтому управление формируют в системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети. Такое допущение позволяет достичь независимого управления моментом и реактивной мощностью статорной цепи МДП, если токи ротора задавать в виде [2], [3]

$$i_{2d} = -\frac{2}{3} \frac{L_1}{L_m} \frac{\omega_1}{U_m} M^*, \quad (2)$$

$$i_{2q} = \frac{1}{L_m} \left(-\frac{U_m}{\omega_1} - L_1 i_{1q}^* \right), \quad (3)$$

где M^* – заданный момент, i_{1q}^* – задание для реактивной компоненты тока статора, $L_1 \in L_m$ - индуктивности статора и главного магнитного потока.

Исследуем влияние активного сопротивления статора в случае регулирования момента и реактивной мощности с использованием алгоритма (2), (3).

Выражение для ошибки отработки реактивной компоненты тока статора МДП получим, используя соотношение $\Psi_{1q} = L_1 i_{1q} + L_m i_{2q}$ с $\Psi_{1q}^* = -U_m / \omega_1$

$$\Psi_{1q}^* + \tilde{\Psi}_{1q} = L_1 i_{1q} + \Psi_{1q}^* - L_1 i_{1q}^*. \quad (4)$$

Уравнения динамики ошибок отработки компонент вектора потокосцепления статора $\tilde{\Psi}_{1q} = \Psi_{1q} - \Psi_{1q}^*$, $\tilde{\Psi}_{1d} = \Psi_{1d}$, а также уравнения для ошибок отработки момента $\tilde{M} = M - M^*$ и реактивной компоненты тока статора $\tilde{i}_{1q} = i_{1q} - i_{1q}^*$ имеют вид

$$\dot{\tilde{\Psi}}_{1d} = -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \frac{2}{3} R_1 \frac{\omega_1}{U_m} M^*$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\Psi}}_{lq} &= -\alpha_l \tilde{\Psi}_{lq} - \omega_l \tilde{\Psi}_{ld} - R_l i_{lq}^* \\
\tilde{M} &= \left[-\tilde{\Psi}_{lq} \frac{\omega_l}{U_m} M^* + \frac{3}{2} \frac{1}{L_l} \tilde{\Psi}_{ld} \frac{U_m}{\omega_l} + \frac{3}{2} \tilde{\Psi}_{ld} i_{lq}^* \right] \\
\tilde{i}_{lq} &= \frac{1}{L_l} \tilde{\Psi}_{lq} .
\end{aligned} \tag{5}$$

Положение равновесия $(\tilde{\Psi}_{ld}, \tilde{\Psi}_{lq}, \tilde{M}, \tilde{i}_{lq}) = 0$ системы (5) асимптотически устойчиво только при $M^* = 0$ и $i_{lq}^* = 0$. Следовательно, только в этом случае достигается ориентация по вектору потокосцепления статора, что соответствует ортогональности векторов напряжения статора и вектора потокосцепления статора. Ошибки отработки момента и реактивной компоненты тока статора при этом равны нулю.

В случае $M^* \neq 0, i_{lq}^* = 0$ ориентация по вектору потокосцепления статора нарушается, что приводит к появлению ошибок регулирования момента, поскольку $\tilde{\Psi}_{ld} \neq 0, \tilde{\Psi}_{lq} \neq 0$. Если дополнительно $i_{lq}^* \neq 0$, то ошибка регулирования момента может достигать еще больших значений, в связи с появлением дополнительной составляющей $\tilde{\Psi}_{ld} i_{lq}^*$ в выражении момента. Кроме того, сама реактивная составляющая тока статора регулируется с ошибкой, которая пропорциональна заданию для этой компоненты.

Решив систему (5) относительно ошибок отработки вектора потокосцепления статора, для установившегося режима получим

$$\begin{pmatrix} \tilde{\Psi}_{ld} \\ \tilde{\Psi}_{lq} \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega_l^2 + \alpha_l^2} \begin{pmatrix} \alpha_l & \omega_l \\ -\omega_l & \alpha_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} R_l \frac{\omega_l}{U_m} M^* \\ -R_l i_{lq}^* \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Количественная оценка статических ошибок отработки момента и реактивной мощности статора МДП выполнена для машины со следующими параметрами: $P_n = 920$ Вт, $I_n = 3.5$ А, $U_m = 180$ В, $M_n = 10$ Нм, $n_p = 3$, $\omega_n = 92$ рад/с, $L_1 = L_2 = 0.185$ Гн, $L_m = 0.18$ Гн, $R_1 = 4.7$ Ом, $R_2 = 5.3$ Ом.

На рис. 1 представлены поверхности, которые позволяют количественно оценить статические ошибки регулирования момента и реактивной мощности в зависимости от задания для момента и реактивной компоненты тока статора МДП.

Результаты исследования, представленные на рис. 1, подтверждают теоретические выводы о том, что нулевые ошибки регулирования момента и реактивной компоненты тока статора достигаются только при $M^* = 0$ и $i_{lq}^* = 0$. При $M^* \neq 0$, а $i_{lq}^* = 0$ ошибки регулирования момента могут превышать 10 % от заданного ($M^* = 10$ Нм, $i_{lq}^* = 0$ А), а при одновременном управлении моментом и реактивной мощностью ($M^* = 10$ Нм, $i_{lq}^* = 3$ А), ошибки регулирования момента достигают 22% от заданного. Ошибки регулирования реактивной мощности в большей степени зависят от заданного момента и составляют 0.29 - 0.32 А при $M^* = 10$ Нм, что составляет 8 - 9 % от номинального значения тока статора.

$\tilde{M}, \tilde{i}_{lq}$

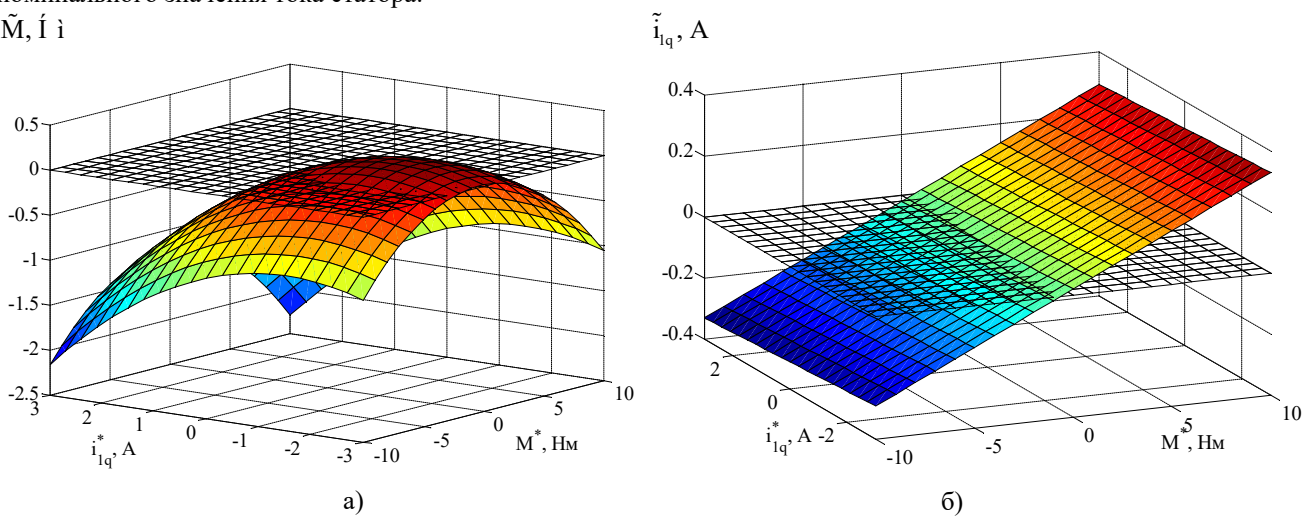


Рис. 1. Статические ошибки регулирования а) момента, б) реактивной компоненты тока статора.

Алгоритм управления моментом с компенсацией влияния активного сопротивления статора

В [4], [5] предложен алгоритм отработки момента со стабилизацией реактивного тока статора на нулевом уровне, не использующий упрощающего допущения $R_1 = 0$. Для случая токового управления ротором алгоритм [4], [5] имеет вид

$$\begin{aligned} i_{2q} &= \frac{1}{\alpha_1 L_m} (\alpha_1 \Psi_{1q}^* + \dot{\Psi}_{1q}^*), \quad \alpha = \frac{R_1}{L_1} \\ \Psi_{1q}^* &= \frac{-U_m - \sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}}{2\omega_1} \\ i_{2d} &= \frac{2}{3} \frac{L_1}{L_m} \frac{M^*}{\Psi_{1q}^*}. \end{aligned} \quad (7)$$

При этом динамическое поведение ошибок отработки потокосцеплений статора, ошибок регулирования реактивной компоненты тока статора и момента МДП описывается следующими уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\Psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega_1 \tilde{\Psi}_{1q} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \omega_1 \tilde{\Psi}_{1d}, \\ \tilde{M} &= \tilde{\Psi}_{1q} \frac{2\omega_1 M^*}{-U_m - \sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}} - \left(3 \frac{-U_m - \sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}}{4\omega_1 L_1} + \frac{\dot{M}^*}{\sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}} \right) \tilde{\Psi}_{1d} \\ \tilde{i}_{1q} &= -\frac{2}{3} \frac{\dot{M}^*}{\sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}} + \frac{\tilde{\Psi}_{1q}}{L_1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\tilde{i}_{1q} = i_{1q}$.

Анализируя полученную систему уравнений можно сделать следующие выводы:

- процессы, протекающие в магнитной подсистеме, не зависят от процессов регулирования механических координат;
- ошибки регулирования потокосцеплений статора и ошибки отработки момента асимптотически стремятся к нулю, т.е. $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\Psi}_{1q}, \tilde{\Psi}_{1d}) = 0$; $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0$;
- ошибка регулирования реактивной мощности возникает только в динамических режимах $\dot{M}^* \neq 0$;
- при $M^* = \text{const}$ обеспечивается асимптотическая стабилизация реактивного тока статора, т.е. $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_{1q} = 0$.

Рассмотрим возможность регулирования реактивного тока статора при использовании алгоритма [4], [5]. Для этого модифицируем выражение для тока ротора по оси q следующим образом

$$i_{2q} = (\alpha_1 \Psi_{1q}^* - R_1 i_{1q}^* + \dot{\Psi}_{1q}^*) / \alpha_1 L_m. \quad (9)$$

Используя (9), уравнения динамики ошибок отработки потокосцеплений могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\Psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega_1 \tilde{\Psi}_{1q} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \omega_1 \tilde{\Psi}_{1d} - R_1 i_{1q}^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) устанавливаем, что при $i_{1q}^* \neq 0$ ортогональность векторов напряжения и потокосцепления статора нарушается.

Решение системы уравнений (10) в установившемся режиме имеет вид

$$\begin{pmatrix} \tilde{\Psi}_{1d} \\ \tilde{\Psi}_{1q} \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega_1^2 + \alpha_1^2} \begin{pmatrix} \alpha_1 & \omega_1 \\ -\omega_1 & \alpha_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -R_1 i_{1q}^* \end{pmatrix}. \quad (11)$$

С учетом модификации (9), выражения для ошибок отработки момента и реактивной компоненты тока статора будут иметь вид

$$\tilde{M} = \frac{M^* 2\omega_1}{-U_m - \sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}} \tilde{\Psi}_{1q} - \frac{\dot{M}^*}{\sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}} \tilde{\Psi}_{1d} - \frac{3}{2} \left(\frac{-U_m - \sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}}{2\omega_1 L_1} - i_{1q}^* \right) \tilde{\Psi}_{1d}$$

$$\tilde{i}_{lq} = \frac{1}{L_1} \tilde{\Psi}_{lq} - \frac{2}{3} \frac{\dot{M}^*}{\sqrt{U_m^2 - 4\left(\frac{2}{3}\right)\omega_1 R_1 M^*}}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что регулирование реактивной компоненты тока статора приводит к появлению ошибок регулирования потокоцеплений статора МДП, которые пропорциональны величине активного сопротивления статора и заданному \dot{i}_{lq}^* , а нарушение ориентации по вектору потокоцепления вызывает ошибки регулирования момента и реактивной компоненты тока статора

На рис. 2 представлены поверхности, которые позволяют оценить значения статических ошибок отработки момента и реактивной компоненты тока статора МДП в зависимости от задания для этих величин.

Результаты исследования, представленные на рис. 2, подтверждают теоретические выводы о том, что рассматриваемый алгоритм управления МДП позволяет осуществить управление моментом и стабилизацию реактивной компоненты тока статора на нулевом уровне с нулевыми статическими ошибками. Как видно из рис. 2, при ненулевом задании для реактивной мощности возникают ошибки регулирования момента, которые достигают 13 % от заданного ($M^* = 10$ Нм, $i_{lq}^* = 3$ А).

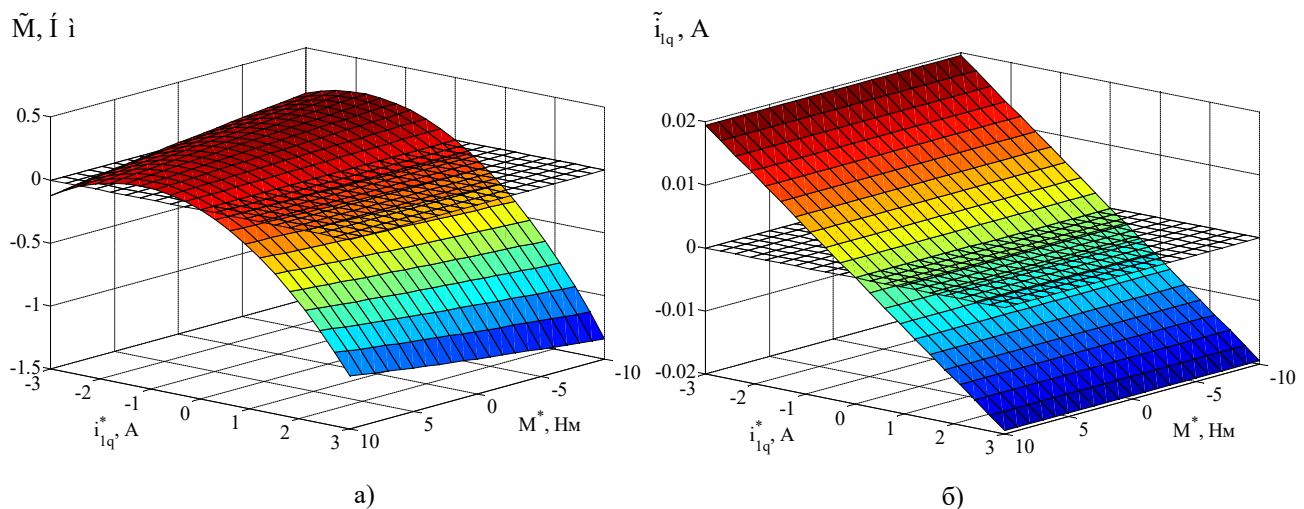


Рис. 2. Статические ошибки регулирования а) момента, б) реактивной компоненты тока статора.

Ошибка регулирования реактивной компоненты тока статора зависит только от величины задания для нее, и значительно меньше, чем ошибки, возникающие при использовании алгоритма с ориентацией по потокоцеплению статора. Полученные ошибки регулирования реактивной компоненты тока статора находятся в пределах ± 0.02 А (0.67 % от заданного).

Выводы

На основании выполненного исследования можно сделать вывод, что алгоритм [2], [3] обеспечивает удовлетворительную точность регулирования момента только при управлении машинами большой мощности, поскольку в силу малости R_1 падение напряжения на активных сопротивлениях статора незначительно по отношению к U_m .

Алгоритм [4], [5] с компенсацией влияния активного сопротивления статора гарантирует высокую точность регулирования момента и стабилизации реактивной мощности на нулевом уровне. Использование этого алгоритма для регулирования реактивной мощности статорной цепи и момента МДП может иметь ограничения из-за ошибок регулирования момента при ненулевом задании для реактивной компоненты тока статора.

Литература

1. Пересада С.М., Король С.В. Синтез алгоритма управления моментом и реактивной мощностью машины двойного питания // В настоящем сборнике.
2. Leonhard W. Control of Electric Drives. – Berlin: Springer-Verlag. – 1996. – 420p.
3. Vas P. Vector Control of A.C. Machines. – Oxford, U.K.: Clarendon Press. – 1990. – 332p.
4. Пересада С. М., Шаповал И. А. Управление моментом и реактивной мощностью асинхронной машины двойного питания на основе косвенной ориентации по вектору потокоцепления статора. // Технічна електродинаміка. – 2002. – №6. – С 13 – 19 .
5. Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of the doubly fed induction machine // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – November 2003. –Vol. 11, No. 6. –P. 875–888.